

Фомичев Юрий Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: fym@tpu.ru

Область научных интересов: средства измерений, разработка калибраторов мощности.

Силушкин Станислав Владимирович, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: slavasv@mail.ru

Область научных интересов: обработка изображений и сигналов, аппаратно-программные измерительные технологии.

УДК 621.317.38:681.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КЛАССА ТОЧНОСТИ КАЛИБРАТОРА МОЩНОСТИ

Ю.М. Фомичев, С.В. Силушкин

Томский политехнический университет

E-mail: msv@tpu.ru

Обсуждается функциональная схема калибратора фиктивной мощности с автоматической коррекцией для поверки измерителей электрической энергии. Предложен синтезатор сигналов на базе платы сбора данных и разработано программное обеспечение для него, проведены экспериментальные исследования его метрологических характеристик.

Ключевые слова:

Электрическая энергия, качество электроэнергии, средства измерений электрической энергии, метрологические характеристики.

Введение

Расширение применения электронных счетчиков повышенной точности (класса 0,2S–0,5S) и появление новой нормативно-методической базы [1–3] привело к необходимости модернизации метрологического обеспечения. В современных электронных счетчиках используются аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), преобразующие мгновенные значения входных сигналов с последующим вычислением измеряемых величин, появились дополнительные функции, связанные с определением качества электрической энергии, что также требует проведения дополнительных метрологических испытаний.

Известны два метода построения поверочных систем:

- 1) метод с использованием непосредственного сличения показаний поверяемого и эталонного приборов;
- 2) метод калибратора мощности, который требует прецизионного задания значений тока, напряжения, фазового сдвига и т. д.

В статье рассматриваются возможности уменьшения погрешности калибраторов фиктивной мощности (КФМ).

1. Выбор структурной схемы калибратора мощности

На рис. 1 приведена структурная схема КФМ типа «Вектор» и «Эника».

В состав калибраторов указанного типа входят следующие основные блоки:

- 1) МК – микроконтроллер управляет работой калибратора по заданной программе и осуществляет контроль аварийных ситуаций;
- 2) ВС – внешняя синхронизация может задаваться МК или от другого задатчика при объединении калибраторов в трехфазную систему;
- 3) синтезатор частоты – позволяет получить сигналы синусоидальной формы заданной частоты (определяется тактовой частотой F_{clk}) и фазовым сдвигом ($\varphi_{U,I}$);
- 4) МЦАП-1 и МЦАП-2 – масштабирующие цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), позволяющие устанавливать значения выходного сигнала по заданной программе (масштабирование определяется коэффициентами K_1 и K_2);

- 5) ПНН, ПНТ – мощные аналоговые выходные каскады преобразователей «напряжение–напряжение» и «напряжение–ток» с постоянными коэффициентами преобразования K_U и K_I соответственно;
- 6) магистраль – осуществляет коммуникацию калибратора с персональным компьютером (ПК).

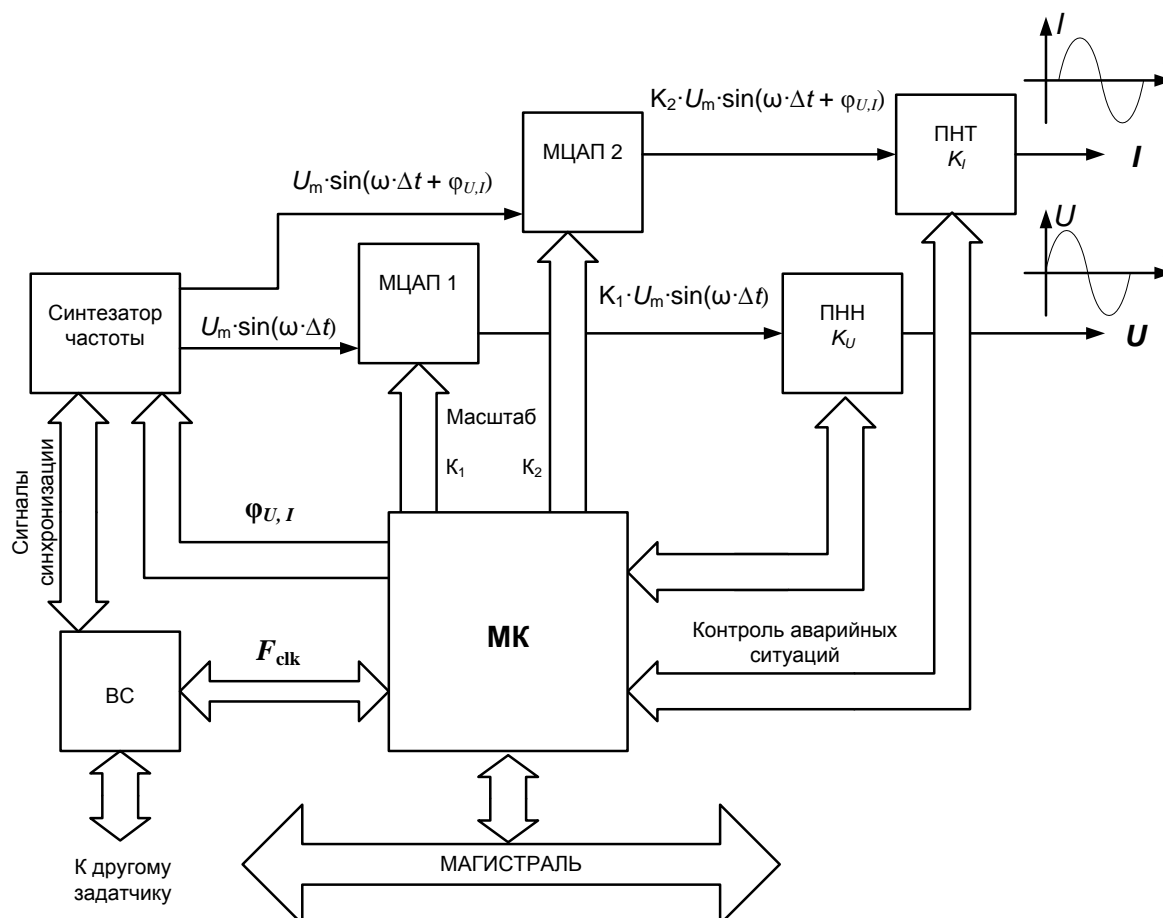


Рис. 1. Структурная схема калибратора фиктивной мощности типа «Вектор» и «Эника»

Программа работы калибратора зависит от типа поверяемых счетчиков электрической энергии и задается в управляющей программе на ПК, в память которого также заносятся результаты поверки/калибровки, которые затем оформляются в виде протоколов испытаний.

Согласно требованиям, установленных ГОСТами предыдущего поколения, поверка осуществлялась при синусоидальной форме сигналов тока и напряжения, которые формировал цифровой синтезатор с заданным сдвигом по фазе относительно друг друга. С помощью МЦАП, ПНТ и ПНН устанавливаются требуемые значения тока, напряжения и фазового сдвига. ПНТ и ПНН – это фактически усилители мощности, которые должны обладать постоянными и стабильными коэффициентами преобразования, а также очень малыми фазовыми сдвигами ($\varphi \leq 0,01^\circ$). Эти параметры обеспечиваются за счет введения очень глубоких обратных отрицательных связей (ООС), порядка 1000. Несмотря на реактивную (емкостную, индуктивную) изменяющуюся по величине нагрузку в узком диапазоне частот (45...65 Гц), задача решалась применением специально разработанных цепей коррекции.

Современные ГОСТы устанавливают требования, согласно которым необходимо проверять погрешность измерения счетчиками при воздействии сигналов сложной формы: с содержанием высших гармоник (до 40...50-й) или субгармоник (интергармоник). Это привело к необходимости расширения полосы рабочих частот ПНТ и ПНН до 2...3 кГц. Для определения влияния субгармоник необходимо сформировать сигнал, вид которого приведен на рис. 2, т. е. требуется изменение скачком тока нагрузки.

- 4) П-1 и П-2 – измерительные преобразователи (резистивный делитель напряжения, трансформатор тока или токовый шунт) для приведения выходных сигналов напряжения и тока к уровню измеряемых сигналов АЦП;
- 5) ПК – управляет работой калибратора, сохраняет в память результаты поверки/калибровки счетчиков и позволяет формировать протокол испытаний.

Работа КФМ осуществляется следующим образом:

- по команде с компьютера синтезатор формирует сигналы с заданной амплитудой, формой, частотой и фазовым сдвигом для каналов тока и напряжения;
- масштабирующая цепь (МЦАП) выставляет за счет заданных коэффициентов K_1 и K_2 необходимую амплитуду на вход преобразователей ПНТ и ПНН, которые имеют постоянные коэффициенты преобразования;
- выходные сигналы нормируются преобразователями П-1 и П-2 и подаются на АЦП ПСД;
- АЦП-1 и АЦП-2 преобразуют сигналы тока ($I_{(\varphi)}$) и напряжения (U) в цифровой код, а полученный код поступает в управляющую программу на ПК, где вычисляется мощность выходного сигнала;
- полученный результат вычисления мощности сравнивается с заданным значением, при возникшей разнице значений происходит коррекция задаваемых значений мощности. Так как отличие выходной мощности компенсируется, соответственно, уменьшается погрешность калибровки мощности;
- цикл повторяется через 3–5 мин или при установке новых параметров выходных сигналов.

Рассматриваемое решение основывается на применении современных плат сбора данных, например NI 6251 [5]. Данная плата в своем составе имеет двухканальный ЦАП и быстродействующий АЦП, а также позволяет интегрировать ее в измерительную установку. При этом нет необходимости дополнительно разрабатывать драйвера обмена с компьютером, т. к. компания-производитель (National Instruments, США) предоставляет их в комплекте с платой.

Такой подход позволяет избежать сложных конструктивных особенностей и режимов работы генераторов для формирования сигналов сложной формы (рис. 2).

2. Синтезатор сигналов на базе платы сбора данных

Эксплуатация различных устройств (компьютерная техника, телевизоры, освещение, источники бесперебойного питания, трансформаторы и пр.) как в быту, так и в промышленности приводит к появлению высших гармоник в сигналах тока с низкой стороны [6]. Последствия появления высших гармоник – это необоснованные экономические потери, связанные с выходом из строя оборудования и повышенным износом изоляции, а также некорректный учет потребляемой энергии из-за необходимости проводить измерения сигналов не только синусоидальной, но и несинусоидальной формы. При этом генерируемые сигналы от производителя с высокой стороны остаются в пределах требований, предъявляемых к качеству электроэнергии.

Промышленностью выпускаются различные цифровые СИ (вольтметры, амперметры, осциллографы) в модульном исполнении, например компания National Instruments выпускает модули в стандарте PXI [7], которые можно использовать для создания систем измерения мощности на основе цифровой обработки сигналов (подобное решение рассмотрено авторами в работе [8]). Компания выпускает также и ПСД (DAQ-Board), которые используются как отдельно стоящее устройство и как встраиваемое в разрабатываемую установку.

На базе платы NI USB-6251 и программной среды LabVIEW 2009 был реализован синтезатор (генератор) и анализатор сигналов, рис. 4.

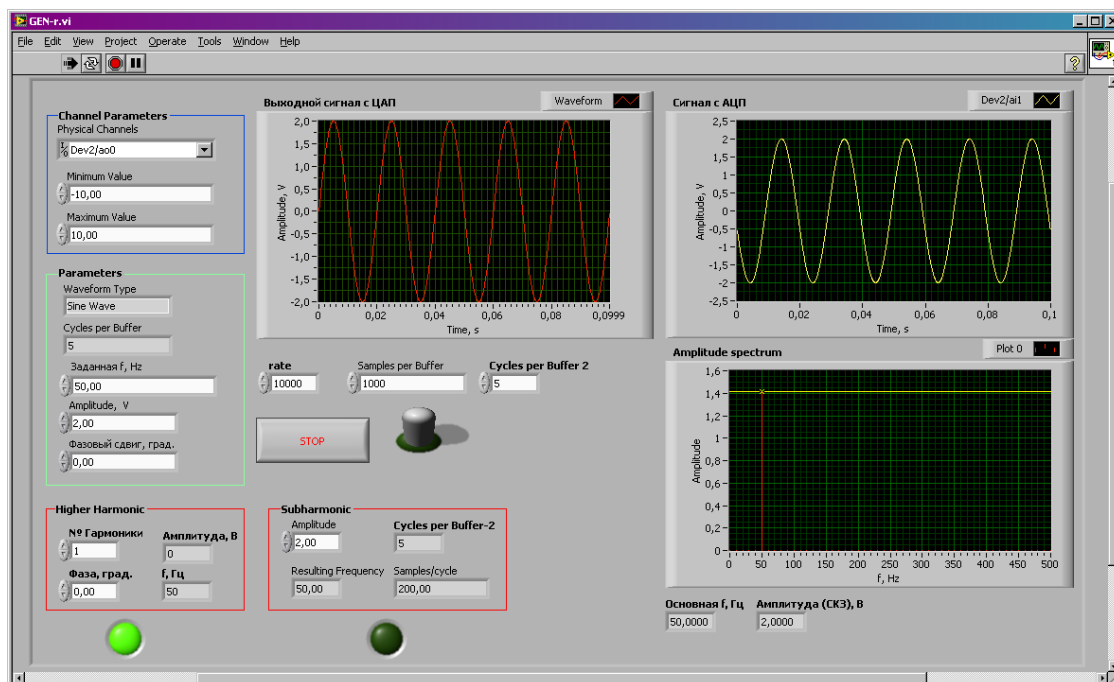


Рис. 4. Генератор и анализатор сигналов

Данное программное обеспечение позволяет сформировать сигнал синусоидальной формы, сигнал с интергармоническими составляющими (субгармониками) или высшими гармониками (рис. 5), а затем передать его на ЦАП.

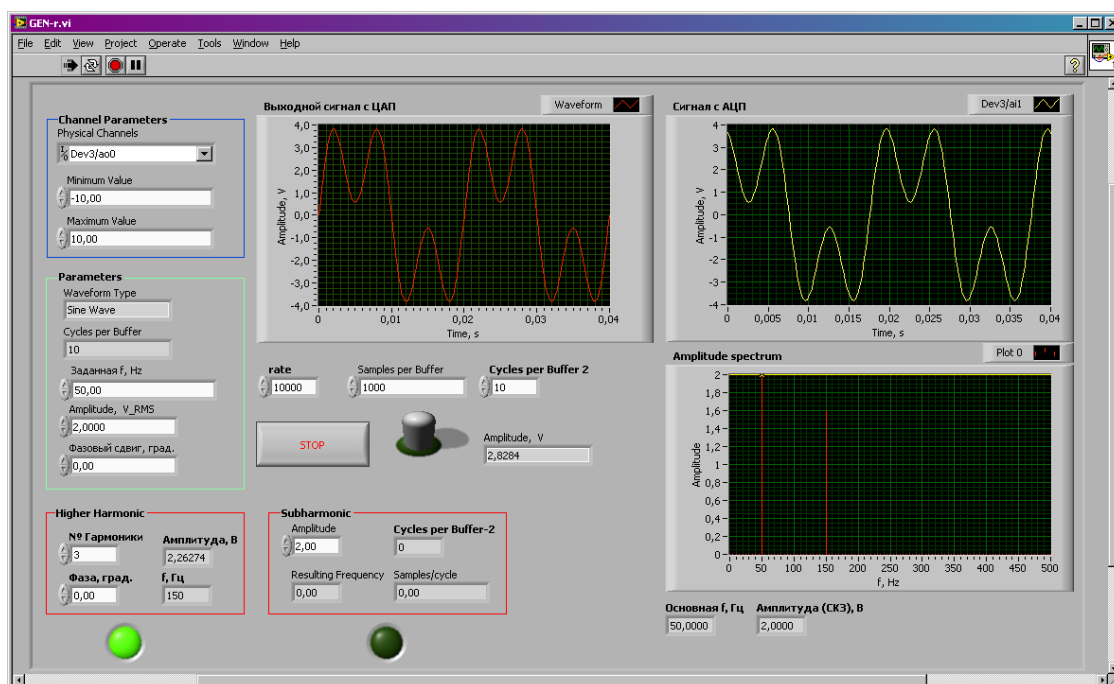


Рис. 5. Генератор и анализатор сигналов в режиме формирования сигнала с высшими гармоническими составляющими (в сигнале присутствует 3-я гармоника)

Одновременно с этим производится измерение АЦП сгенерированного сигнала и определение погрешности генерации его амплитуды и частоты. Эту операцию предлагается использовать в разрабатываемом КФМ, когда проводится контроль выходных сигналов измерительных трактов для повышения класса точности калибратора.

На рис. 4 приводится пример прямого измерения генерируемого сигнала, из которого видно, что погрешность генерации сигналов, пройденных через ЦАП и АЦП, сводится к нулю. Это обеспечивается высокой разрядностью используемых преобразователей.

Измерение мощности сигналов предлагается производить на основе уже разработанных программных продуктов, предложенных авторами в работе [8].

Дальнейшие исследования и установление метрологических характеристик используемой платы необходимо провести на эталонном оборудовании.

3. Экспериментальное исследование метрологических характеристик

ПСД позволяет воспроизводить и измерять следующие параметры сигналов: амплитудные (действующие) значения напряжения; фазовый сдвиг между сигналами; частоту гармонических сигналов; активную, реактивную и полную мощности как синусоидальных, так и несинусоидальных сигналов (дополнительно рассчитывается мощность искажения); коэффициент гармоник (коэффициент искажения синусоидальности кривой).

На текущем этапе работ проверялась точность:

- 1) ЦАП – для формирования гармонических сигналов с заданной частотой и амплитудой;
- 2) АЦП – для измерения амплитуды и частоты сигналов.

Для определения точности проведенных измерений использовалось поверенное оборудование, относящееся к рабочим эталонам: частотомер ЧЗ-35А, мультиметр Agilent 3458А, калибратор Fluke 5520А.

Измерение действующих значений напряжения и частоты сигналов, формируемых ЦАП

Исследовались погрешности формирования действующих значений напряжения ЦАП платы сбора данных, диапазон частот формирования сигналов – от 50 Гц до 2,5 кГц.

Погрешность формирования частоты генерируемых сигналов (δf) с ЦАП контролировалась с помощью частотомера ЧЗ-35А. Для измерения значений напряжения в диапазоне $U_0 = 0,5 \dots 7,0$ В использовался мультиметр Agilent 3458А, результаты измерений представлены в табл. 1.

Относительная погрешность измерений рассчитывалась по формуле:

$$\delta = \pm \frac{X_0 - X_{\text{э}}}{X_{\text{э}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где X_0 – заданные значения соответствующей физической величины; $X_{\text{э}}$ – показания рабочего эталона.

Таблица 1. Погрешность формирования ЦАП значений напряжения в частотном диапазоне, %

Напряжение U_0 , В	Частота сигнала f , кГц								
	0,05	0,10	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	1,00	2,50
0,1	0,004	-0,002	0,000	-0,001	0,001	-0,001	0,000	0,000	-0,004
0,5	0,028	-0,010	0,000	-0,004	0,002	-0,002	0,000	0,002	0,006
1,0	-0,002	-0,010	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,006
1,5	0,033	-0,007	-0,007	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007
2,0	0,040	-0,010	-0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005
3,0	0,033	-0,007	-0,003	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,003
4,0	0,035	-0,010	0,000	-0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005
5,0	0,028	-0,008	0,000	-0,002	0,002	-0,002	0,002	0,000	0,004
7,0	0,017	-0,009	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,004

Результаты измерений, приведенные в табл. 1, показали, что погрешность формируемых значений амплитуды и частоты напряжения не превышает 0,04 %, т. е. ЦАП исследуемой платы позволяет формировать выходные сигналы с необходимым запасом точности.

Измерение действующих значений напряжения и частоты сигналов с помощью АЦП платы сборки данных

Исследовались погрешности измерения действующих значений напряжения, для чего был использован калибратор Fluke 5520A как источник входных сигналов напряжения в диапазоне частот от 50 Гц до 2,5 кГц, диапазон измеряемых напряжений $U_0 = 0,5 \dots 3,5$ В. Относительная погрешность измерений рассчитывается по формуле (1). Результаты измерений представлены в табл. 2. Значения частоты генерируемых сигналов (δf) контролировалась частотометром ЧЗ-35А.

Таблица 2. Погрешность измерений значений напряжения в частотном диапазоне, %

Напряжение U_0 , В	Частота сигнала f , кГц								
	0,05	0,10	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	1,00	2,50
0,1	-0,024	-0,040	-0,033	-0,019	-0,032	-0,020	-0,049	-0,028	-0,020
0,5	-0,019	-0,021	-0,019	-0,019	-0,019	-0,020	-0,020	-0,018	-0,018
1,0	-0,011	-0,011	-0,010	-0,011	-0,011	-0,010	-0,011	-0,011	-0,011
1,5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
2,0	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010
3,0	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
3,5	-0,023	-0,023	-0,023	-0,023	-0,026	-0,026	-0,026	-0,026	-0,026

Результаты измерений, приведенные в табл. 1 и 2, показали, что погрешность измерений значений напряжений не превышает 0,04 %, т. е. не выходит за пределы установленных в технической документации на NI USB-6251 [5].

Заключение

Предложена функциональная схема КФМ с обратной связью по мгновенному значению и автоматической коррекцией погрешности.

Предложенный калибратор имеет модульную структуру, поэтому его можно адаптировать к требованиям заказчика, а его параметры могут быть улучшены путем добавления модулей формирования и обработки сигналов в состав программного обеспечения, а также заменой аппаратных модулей на модули с более высокими метрологическими характеристиками.

Экспериментально показано, что синтезатор сигналов на базе платы сбора данных обеспечивает формирование и измерение параметров сигналов в частотном диапазоне от 50 Гц до 2,5 кГц с погрешностью до 0,05 %, что удовлетворяет требованиям по запасу точности для получения КФМ с классом точности 0,1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 8.584-2004. ГСИ. Счетчики статические активной электрической энергии переменного тока. Методика поверки. – Введ. с 2005-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 23 с.
- ГОСТ Р 52322-2005 (МЭК 62053-21:2003). Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 21. Статические счетчики активной энергии классов точности 1 и 2. – Введ. с 2005-07-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 24 с.

- 3 ГОСТ Р 52323-2005 (МЭК 62053-22:2003). Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 22. Статические счетчики активной энергии классов точности 0,2S и 0,5S. – Введ. с 2005-07-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 20 с.
- 4 Фомичев Ю.М., Силушкин С.В. Современное состояние автоматизированных систем поверки средств измерений параметров электрической энергии // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 2 (8). – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/692/504> (дата обращения: 22.09. 2013)
- 5 National Instruments / NI 625x Specifications, 2007. – URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371291h.pdf> (дата обращения: 22.09.2013).
- 6 Кобелев А.В., Зыбин А.А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 187–191.
- 7 National Instruments / PXI Platform, 2012. – URL: <http://www.ni.com/pxi> (дата обращения: 22.06.2012).
- 8 Силушкин С.В., Муравьев С.В., Фомичев Ю.М., Емельянова Е.Ю. Цифровой измеритель мощности сигналов сложной формы на базе PXI-платформы // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 176–181.

Поступила 08.11.2013 г.